桑村 仁氏の討論に対する回答

THE AUTHOR'S ANSWER TO DISCUSSION BY HITOSHI KUWAMURA

(Hitoshi KUWAMURA, J. Struct. Constr. Eng., AIJ, Vol. 77, No. 676, 995-996, Jun., 2012)

神戸 渡*, 弘末幹明**, 中込忠男***, 板垣直行****, 飯島泰男*****

*Wataru KAMBE, Motoaki HIROSUE, Tadao NAKAGOMI,**Naoyuki ITAGAKI and Yasuo IJIMA*

The authors thank Prof. Hitoshi Kuwamura for his discussion, and the answers are as follows:

- 1) There would be a defect similar to crack around wood-processing, so fracture mechanics is a valid method to estimate the structural members of timber engineering.
- 2) For improving the estimating methods of strength including cracks in wooden materials or timber members, the development of new measuring techniques of crack propagation is needed.

Keywords : *Wood, Fracture toughness, Splitting, Mode I, J-integral*

木材, 破壊靱性, 割裂, モード I, J積分

この度は貴重なご意見, ご質疑を賜りありがとうございます。ご討議に関する私見を以下に述べさせていただきます。

1. 木材の割裂に対する破壊力学的手法の合理性について

1) 「き裂の形状・サイズ・場所が感知できなければ, 破壊の予測はできません」は納得できますが, 「材料力学的手法の方が有効であることは明白です」は承伏しかねます。

ご指摘の通り, き裂の定義が無ければ破壊力学の定義はできません。その事に関して既報において, 破壊の起点となる接合部付近の傷の存在を確認しています¹⁾。ただし, その大きさ・位置を把握することは不可能ですので, 論文中ではこれを“等価き裂”で置き換えることによって工学的な判断ができる土俵に載せようという試みを行いました。近年の報告の中で, Susanti 等²⁾は破壊力学を応用し, 木材加工した面にき裂と等価なものがあることを定義し, そこに材料力学的に求まる曲げ強度を入力することで破壊靱性値を算出する方法の提案をしております。農学の材料分野・破壊力学の分野においても, き裂の存在が議論の場に載ったと思います。

以上のように, 加工により木材内にき裂が存在し, それが破壊現象に関わっていることは明らかです。よってそれを説明・評価するために破壊力学の理論, あるいは破壊力学的手法の適用を試みることは

は必要なことと考えております。しかし木質構造の分野では, 純粋に破壊力学のみで解を得るレベルに達していないことも事実です。そのため材料力学的手法と組み合わせた検討があるものと判断できます³⁾。

誤解があるようなのでお答えしますと, 筆者等は欧州の潮流のっているわけではありません。それらの検討では, 破壊力学で定義されるべき脆性破壊と延性破壊を正確に区別していないこと⁴⁾, 存在するか否かが分からない要素を仮定して数式化していること⁵⁾, このような問題点があると筆者は考えております。ちなみに文献⁶⁾を確認しますと, 欧州における手法はコンクリートにおける手法を用いていると推測できます。コンクリートにおいても, 破壊力学の適用が可能かどうか長きに渡る議論があり, その上で従来の破壊力学が適用できない部分に独自の評価方法・評価指標を得るに至っております。このことを鑑みれば, 木材においても桑村氏のご指摘の問題点はあるにせよ, 破壊力学的手法の適用を放棄するのは早計と思われます。

筆者等は, 以上の歴史的経緯を考慮し, 鋼材・コンクリート分野で提案されている実験方法・算出方法, 木質構造における既往の方法, これらを総合的に考慮した上で最適と思われる方法を採用しています。更に, 桑村氏のようなフラクトグラフィを伴っていないことも欧州の方法の問題かと思えます。4)および3章に対する回答になる

* 東京理科大学工学部第一部建築学科 助教・博士(工学)

** 当時 信州大学大学院 大学院生

*** 信州大学工学部建築学科 教授・工博

**** 秋田県立大学システム科学技術学部

准教授・博士(工学)

***** 秋田県立大学木材高度加工研究所 教授・農博

Assistant Prof., Faculty of Engineering, Tokyo Univ. of Sci., Dr. Eng.

Formerly Graduate Student, Shinshu Univ.

Prof., Faculty of Engineering, Shinshu Univ., Dr. Eng.

Assoc. Prof., Faculty of Systems & Tech., Akita Pref. Univ., Dr. Eng.

Prof., Institute of Wood Technology, Akita Pref. Univ., Dr. Agr.

かと思いますが,“延性的破壊”という呼び方は破面観察⁷⁾と巨視的な観察に基づき,脆性破壊と区別することを目的として仮に名付けたものであります。筆者等は木質材料の特徴と,本質的な理論との相似点を併せて考慮しており,これが一連の研究の独自性であります。

鉄骨構造の溶接欠陥に対して非破壊検査および破壊力学が効力を発揮することは周知のことですが,残念ながら木材分野では適切な手法は確立しておりません。これは,節などのない無欠点の材料であってもバラツキがあり,その影響とき裂の影響を明確に判断することが難しいことに起因していると考えます。よって前述の“等価き裂”のように,某かの工学的判断に基づく仮定に頼らざるを得ないというのが現状ではないかと思ひます。

2) 先前述の通り,構造部材と破壊靱性試験片の相関性は確認しております。

3) 鋼材で予き裂を入れることは承知しております。繊維直交方向の曲げ実験を行う場合,バラツキの問題,き裂の瞬間的な伝播などが影響し,予き裂を与えることが難しいという問題点があります。試行錯誤の上,安定した実験が可能な条件としてカッターを入れる方法を提案しました。また回転刃のみの加工で初期き裂を設けた試験体による報告が多数あります(例えば 4)。この場合,加工面には角部が 2 箇所存在します。上の試行錯誤の際,1 カ所に割れが発生し,その後もう一方に割れが発生することを確認しています。割れが複数あることは,それに適した考え方が別途必要となるため,ここでは採用していません。

4) フラクトグラフィを行うことは当然かと思ひます。鋼材であれば,進展量の測定が可能であり,その特徴も明確です。Vasic 等⁷⁾は連続的に表面観察を行っており,このような手法が現状としては限界なのかと思ひます。よって観察技術の開発,さらに実建築物にも適用できる技術の開発が必要と考えています。

5) ご指摘の通り,鋼材では発生しない問題です。ただし,もっと問題視すべきは,これまでの知見は年輪が無い材料を用いた検討が多いということです。そのような材料に基づく手法では,建築分野に貢献できる知見は得ることは難しいと考えています。その問題を脱却するために,一般的な材を用いた丹念な観察と,他材料における一般理論との違いを考慮しながら,検討を進めています。

以上,木質材料における破壊に関する問題点を考慮しつつ,討論に対する回答を述べました。桑村氏の指摘されていることは適切であります,木材の特徴として妥協せざる得ない点を考慮しつつ,工学的判断に基づき適切な解を得ようとする試みであることをご理解いただけると幸いです。木質材料の特徴を考慮すると,ある範囲までは数学的に表現できますが,それを越えた範囲では測定技術の発展を伴わなければ解決できない問題が山積していると考えています。それらが解決する課程において,より適切な手法が何であるのかが改めて議論できるのではないかと考えます。

2. 木材の延性的破壊の実態について

・1 段目の指摘に対して

「塑性ひずみを伴うかのような”延性的破壊”という貴論文の表現は不適切と思われます」というご指摘を頂きました。この表現が適切であるか否かは再考する必要があるかと思ひますが,ここを明らかにするためには,更に一段階の議論が必要かと思ひます。それは

Fracture Process Zone(FPZ)の問題です⁹⁾。FPZ はひずみ軟化が生じている領域であり,非線形挙動の要因となります。それらの長さは画像相関法によると 1~2mm 程度とされています¹⁰⁾。今後は FPZ とき裂進展をどのように考慮するか検討が必要と考えています。

・2 段目以降の指摘に関して

まず,き裂進展開始までのエネルギーによって J 積分を算出する手法は日本機械学会基準¹¹⁾を踏襲したものであります。それ以降の進展挙動に関しては,桑村氏のご指摘のような考え方が必要であります。筆者等が着目しているのは,桑村氏の図 1 における 1 の点のみであります。それ以降に関しては,ここまで繰返し述べてきたように,き裂進展挙動の測定・把握ができないため,計算できません。筆者等のこれまでの検討で FEM を多用してきたのは,フラクトグラフィなどを用いずに実大部材の評価が可能であると考えたためです。そのレベルで適用するための材料定数の算出を標準化することを目指してきました,「最大荷重点において,き裂進展がはじまる」という定義が大凡妥当であり,そのレベルに関しては耐力推定が可能であることが分かりました¹⁾。それ以降の挙動の解明と評価手法の開発が今後の課題であり,検討を進めております。桑村氏への回答としては,筆者等の検討では引張り軟化の領域までは検討しておらず,その前の段階のみであります。その段階までであれば,3PB 試験と CT 試験の同値を示すことを確認した,ということであります。

参考文献

- 1) 神戸 渡,中込忠男,伊倉裕太: 繊維直交方向荷重を受けるカラマツ集成材ボルト接合部の脆性破壊に対するローカルクライテリアの適用,日本建築学会構造系論文集,第 611 号,pp.111-118,2007.1
- 2) C.M.E. Susanti, T. Nakao, H. Yoshihara: Examination of the failure behaviour of wood with a short crack in tangential-radial system by single-end-notched bending test, Engineering Fracture Mechanics, 77, pp.2527-2536, 2010
- 3) H. Yoshihara, A. Satoh: shear and crack tip deformation correction for the double cantilever beam and three-point end-notched flexure specimens for mode I and mode II fracture toughness measurement of wood, Engineering Fracture Mechanics, 76, pp.335-346, 2009
- 4) Nordtest Methods NT BUILD 422, Wood: Fracture energy in tension perpendicular to the grain, 1993.
- 5) J.L. Jensen: Quasi-non-linear fracture mechanics analysis of the splitting failure of single dowel joints loaded perpendicular to grain, J. Wood Sci., 51, pp.559-565, 2005
- 6) 三橋博三,六郷恵哲, 国枝 稔: コンクリートのひび割れと破壊の力学 – 現象のモデル化と制御-, pp.54-58, 技報堂, 2010
- 7) 神戸 渡: FEM を木質構造における破壊力学に応用する方法とその問題点, 第 104 回 京都大学 生存圏シンポジウム,配付資料, 2008.9
- 8) S. Vasic, I. Smith, E. Landis: Fracture zone characterization-micro-mechanical study, Wood and Fiber Sci., 34, 1, pp.42-56, 2002
- 9) M. Masuda: Application of the finite small area fracture criteria to bending of beams with end sloped notches, Proceedings of int. Wood Eng. Conf., 4, 136-143, 1996
- 10) 永井博昭: 画像相関法による有節材の欠点検出および非線形破壊挙動解析,京都大学 博士論文,2011
- 11) 日本機械学会: 弾塑性破壊靱性 J_{IC} 試験方法,pp.1-20,1981

(2012年 3 月12日原稿受理, 2012年 3 月13日採用決定)